

GPS-Antennenkalibrierungen aus nationaler und internationaler Sicht

Markus Rothacher und Ralf Schmid

Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie und
Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München
Arcisstrasse 21, D-80230 München
Tel. ++ 49 / 89 289 23191, Fax ++ 49 / 89 289 23178
E-Mail: rothacher@bv.tum.de

Abstrakt

Heute stehen drei Hauptmethoden zur Verfügung, um GPS-Empfängerantennen zu kalibrieren: (1) die relative Feldkalibrierung mit Hilfe von GPS-Daten, die auf kurzen, genau bekannten Basislinien gesammelt werden, (2) die absolute Feldkalibrierung, bei der die GPS-Antenne von einem Roboter dauernd gedreht und gekippt wird und schließlich (3) die Messungen in einem mikrowellentoten Raum. In diesem Artikel werden die elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen (PCVs: Phase Center Variations) von GPS-Antennen, die mit jeder dieser drei Techniken kalibriert wurden, auf ihre Übereinstimmung und Genauigkeit hin geprüft.

Die Verwendung dieser Antennenkalibrierungswerte in der Analyse des globalen Netzes des International GPS Service (IGS) zeigt jedoch, dass diese Werte zu einem großen Skalenfaktor in den globalen Lösungen von ca. 15 ppb führen und dass daher auch die Offsets und Variationen der Satellitenantennenphasenzentren mitberücksichtigt werden müssen, um ein einheitliches, konsistentes Bild zu erhalten.

Es wurde deshalb der Versuch unternommen, nicht nur die Satellitenantennenoffsets (wie dies schon früher gemacht wurde) sondern auch die Variationen der Satellitenphasenzentren in Abhängigkeit des Nadirwinkels zu bestimmen. Die Resultate werden hier dargestellt und in den Rahmen der internationalen Aktivitäten im Bereich der GPS-Antennenkalibrierung gestellt.

Methoden der GPS-Antennenkalibrierung

Die drei heute verfügbaren Methoden, um mittlere Phasenzentrumsoffsets und elevations- und azimutabhängige Variationen des Phasenzentrums von GPS-Empfängerantennen zu bestimmen, sind:

- Absolute Messungen in mikrowellentoten Räumen (Kammermessungen)
- Relative Feldkalibrierungen (GPS-Messungen)
- Absolute Feldkalibrierungen mit einem Roboter (GPS-Messungen)

Wenn eine GPS-Antenne in einem mikrowellentoten Raum aufgestellt wird, so lassen sich die absoluten Variationen des Phasenzentrums dieser Antenne (d.h. unabhängig von einer Referenzantenne) durch Messung der Phasenänderung bei der Drehung und Kippung der Antenne bestimmen. Es werden dabei simulierte GPS-Signale verwendet. Der Punkt, um den die Antenne rotiert wird, muss sehr genau gegenüber dem physikalisch definierten Antennenreferenzpunkt (ARP) eingemessen werden.

Bei den relativen Feldkalibrierungen können (weil GPS eigentlich ein interferometrisches Verfahren ist) die mittleren Offsets und Phasenzentrumsvariationen einer GPS-Antenne nur relativ

zu einer anderen Antenne, der Referenzantenne, bestimmt werden. Beide Antennen werden zusammen mit den GPS-Empfängern auf einer sehr kurzen, sehr genau bekannten Basislinie aufgestellt. Die GPS-Daten dieser Basislinie werden dann dazu verwendet, die Lage des Phasenzentrums in Abhängigkeit des Zenit- und Azimutwinkels des einfallenden Signals zu bestimmen. Diese Methode wurde in der Vergangenheit vielfach und mit viel Erfolg angewendet, um die meisten geodätischen GPS-Antennen zu kalibrieren [Rothacher et al., 1995; Mader, 1999].

Absolute Feldkalibrierungen können mit Hilfe eines Präzisionsroboters durchgeführt werden, der die zu kalibrierende Antenne dreht und kippt, während die Referenzantenne unverändert bleibt. Diese Kalibrierungsmethode wurde gemeinsam vom Institut für Erdmessung (IfE) der TU Hannover (Prof. G. Seeber) und der Firma Geo++ erarbeitet und ist in [Menge et al., 1998; Wübbena et al., 2000] detailliert beschrieben.

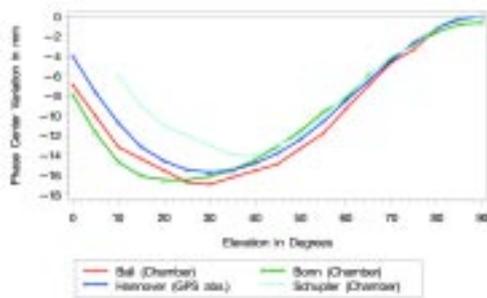
Diese Methode kombiniert die Vorteile der anderen Verfahren: man erhält absolute PCVs; die ganze Antennenhemisphäre kann homogen mit Beobachtungen abgedeckt werden; Multipath kann im Analyseverfahren weitgehend reduziert werden; PCVs können bis 0° Elevation hinunter bestimmt werden; und die Antenne wird im Freien in einer gewöhnlichen Umgebung aufgestellt (im Gegensatz zu den Kammermessungen).

Vergleich der Variationen des Antennenphasenzentrums

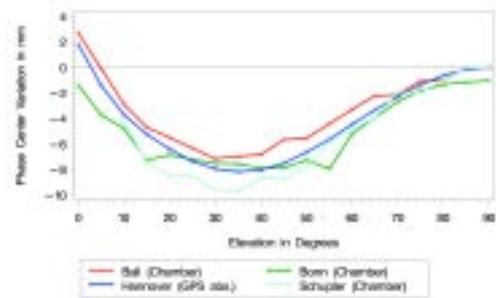
Um die Qualität und Konsistenz der verschiedenen Kalibrierungsmethoden und Resultate studieren zu können, wurden zuerst 4 Sätze von absoluten Kalibrierungswerten verglichen, bei denen in jedem Fall die drei gleichen Antennentypen beteiligt waren, nämlich die AOAD/M_T (Dorne Margolin T) und die zwei Trimble-Antennen TRM22020.00+GP und TRM14532.00:

- 1) Kammermessungen, die 1994 und 1995 von [Schupler et al., 1996] durchgeführt wurden. Diese absoluten Phasenzentrumskalibrierungen wollen wir im Folgenden mit „Schupler“ bezeichnen.
- 2) Mit beträchtlichem Aufwand wurden von UNAVCO 1995 Antennenmessungen in einem mikrowellentoten Raum der Ball Aerospace aufgezeichnet [Rocken et al., 1996]. Diesen Antennensatz bezeichnen wir mit „Ball“.
- 3) Die absoluten Feldkalibrierungen mit einem Roboter, die von IfE/Geo++ 1999/2000 organisiert wurden, werden wir einfachheitshalber mit „Hannover“ bezeichnen.
- 4) Kammermessungen, die durch das Geodätische Institut in Bonn am Max Planck Institut für Radioastronomie durchgeführt wurden. Wir wollen diesen Satz „Bonn“ nennen.

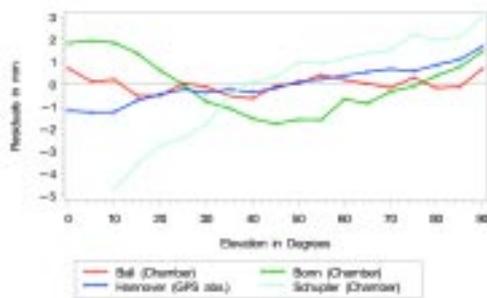
Diese vier Sätze wurden kombiniert zu einer Gesamtlösung. Die PCVs der vier Sätze sowie die Residuen gegenüber den kombinierten Antennenphasenzentrumsvariationen sind in Abbildung 1 für die AOAD/M_T-Antenne für beide Frequenzen dargestellt. Wir sehen, dass die Differenzen zwischen den vier unterschiedlichen Resultaten im Bereich von 1-4 mm liegen. Dies ist sehr ermutigend, insbesondere weil die PCVs von „Ball“ und von „Hannover“, die mit zwei völlig unabhängigen Methoden bestimmt wurden, eine sehr schöne Übereinstimmung zeigen (fast überall kleiner als 1 mm). Ein Problem ist bei den L2-Kammermessungen von Schupler sichtbar. Die Ursache ist den Autoren allerdings nicht bekannt. Auch bei anderen Antennentypen gibt es ab und zu Unstimmigkeiten zwischen den verschiedenen Kammermessungen (z.B. L2 der TRM14532.00).



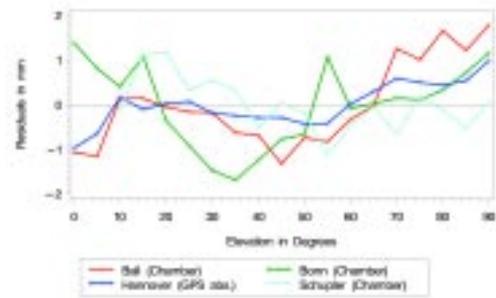
(a) Absolute PCVs, L1-Frequenz



(b) Absolute PCVs, L2-Frequenz



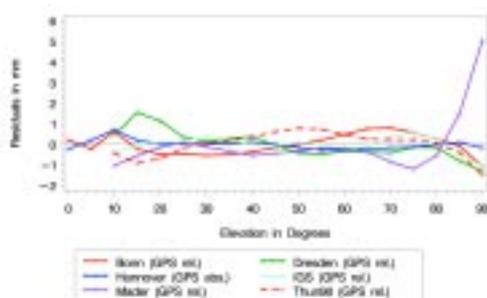
(c) PCV-Residuen, L1-Frequenz



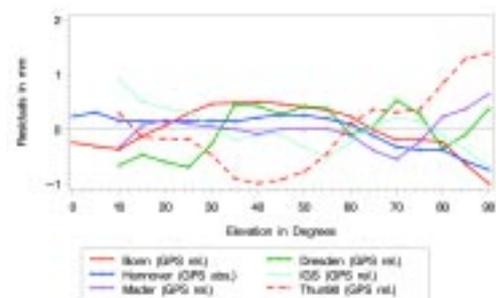
(d) PCV-Residuen, L2-Frequenz

Abbildung 1: PCVs und PCV-Residuen von 4 absoluten Kalibrierungssätzen gegenüber dem kombinierten Satz von elevationsabhängigen PCVs (Mittelwert) für die Antenne AOAD/M_T.

Um festzustellen, wie gut die absoluten Feldkalibrierungen von Hannover (Roboter) mit den relativen IGS-Werten (siehe <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/b/station/general>, Datei igs_01.pcv) und den relativen Feldkalibrierungen aus verschiedenen Quellen übereinstimmen, haben wir die Differenzen zwischen den PCVs einer Antenne und der AOAD/M_T-Antenne (als Referenz) gebildet. Die Vergleiche dieser relativen PCVs sind in Abbildung 2 für das Antennenpaar TRM14532.00 und AOAD/M_T gegeben. Dabei wurden neben den Hannover- und IGS-Werten auch noch die Werte von weiteren relativen Kalibrierungskampagnen hinzugezogen, so die Werte von Gerry Mader (NGS, US), von Bonn, Dresden und Thun (Schweiz). Die IGS-Werte wurden im July 1996 als eine Kombination der relativen Feldmessungen verschiedener Gruppen berechnet, um die bestmöglichen Kalibrierungswerte zu erhalten.



(a) L1-Frequenz



(b) L2-Frequenz

Abbildung 2: Abweichungen der relativen elevationsabhängigen PCVs (Differenz zwischen der Trimble TRM14532.00 und der AOAD/M_T Antenne) vom Mittelwert aller Sätze.

Die Abbildung 2 zeigt nicht nur, dass die relativen PCVs verschiedener Institutionen nur geringe Abweichungen aufweisen, sondern auch, dass die Hannover-Werte sehr gut dazu passen (im Millimeterbereich). Man sieht auch, dass die Werte von Gerry Mader (NGS) bei einer Zenitdistanz von Null stärker von den anderen Sätzen abweichen. Dies dürfte auf die Parametrisierung der PCVs am NGS als Polynom niedrigen Grades zurückzuführen sein.

Insgesamt erkennen wir, dass die absoluten Hannover-Werte sehr vielversprechend sind.

Einfluss der Absoluten PCVS auf Globale GPS-Lösungen

Absolute Empfänger-PCVs aus Kammermessungen sind bereits seit einigen Jahren in Umlauf. Wir können uns daher fragen, wieso der IGS nicht schon längst auf solche absoluten (und damit korrekteren) PCVs umgestiegen ist und an der Verwendung von relativen PCVs festgehalten hat, die auf der nicht fundierten Annahme beruhen, dass die AOAD/M_T-Antenne keine elevationsabhängigen PCVs aufweist. Der Grund dafür ist, dass die absoluten PCVs sehr stark von den IGS-Werten abweichen und daher völlig unterschiedliche globale Lösungen zur Folge haben. Die absoluten PCVs von („Ball“, „Schupler“ oder „Hannover“) ergeben in globalen Lösungen eine Skalierung des globalen Netzes von etwa 15 ppb. Ein solcher Skalierungsfaktor entspricht einer Änderung aller Stationshöhen um rund 10 cm, also eine Änderung, die um einen Faktor 5-10 größer ist als die Qualität heutiger GPS-Resultate und mit den Resultaten von VLBI (Very Long Baseline Interferometry) und SLR (Satellite Laser Ranging) nicht vereinbar sind [Springer, 1999]. Wenn die IGS-Werte in globalen Lösungen verwendet werden, so beträgt der Unterschied in der Skalierung im Vergleich zu VLBI und SLR nur rund 1-2 ppb. Aus diesem Grund waren die Kammermessungen vielen GPS-Experten suspekt. Im vorhergehenden Abschnitt haben wir jedoch erkannt, dass zwei völlig unabhängige Methoden (Roboter- und Kammermessungen) für die AOAD/M_T-Antenne (d.h. die Antenne, die im IGS-Netz am weitesten verbreitet ist) zu fast identischen Resultaten führen. Außerdem sind die Hannover-Werte sehr konsistent mit den relativen IGS-Werten.

Wir sind daher zu der Schlussfolgerung gezwungen, dass die absoluten PCVs der AOAD/M_T-Antenne höchst wahrscheinlich korrekt sind und dass wir eine andere Erklärung für die unakzeptable Skalierung finden müssen: die Variationen des Satellitenantennenphasenzentrums.

Antennenphasenzentrum der GPS-Satelliten

Im Vergleich zu unserem doch recht detaillierten Wissen über das Verhalten von GPS-Empfängerantennen ist nur sehr wenig über die entsprechende Problematik bei den GPS-Satellitenantennen bekannt, über deren Phasenzentrumsoffsets und -variationen. Dies ist um so erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass die Satellitenantennen doch wesentlich größer sind als die Empfängerantennen am Boden und eine solche GPS-Satellitenantenne zudem ja aus zwei konzentrischen Ringen von individuellen Helixantennen besteht (siehe [Aparicio et al., 1996]). Daher sind ganz klar Änderungen des Antennenphasenzentrums in Abhängigkeit der Aussenderrichtung zu erwarten. Es ist jedoch jeweils nur ein Antennenoffset für jeden einzelnen Satellitentyp (Block I, Block II/IIA und Block IIR) bekannt und es ist nicht einmal klar, ob sich diese Werte auf das L1-, L2- oder gar das Phasenzentrum der ionosphärenfreien Linearkombination von L1 und L2 beziehen, das für globale Lösungen am wichtigsten ist.

Abbildung 3 können wir sofort entnehmen, dass man eine ein-eindeutige Beziehung zwischen den Phasenzentrumsvariationen der Empfänger- und Satellitenantennen aufstellen kann. Der z' Nadirwinkel beim Satelliten hängt vom Zenitwinkel beim Empfänger wie folgt ab:

$$\sin(z') = \frac{R}{r} \sin(z)$$

wobei R den Erdradius und r die geozentrische Distanz des Satelliten bezeichnen. Während sich der Zenitwinkel im Bereich von 0° auf 90° bewegt, ändert sich der entsprechende Nadirwinkel beim Satelliten nur von 0° auf ca. 14° . Eine gemeinsame elevationsabhängige Variation $\Delta\phi(z)$ des Phasenzentrums aller Empfängerantennen läßt sich also auch interpretieren als eine Variation $\Delta\phi'(z')$ des Phasenzentrums aller Satellitenantennen und umgekehrt gemäß:

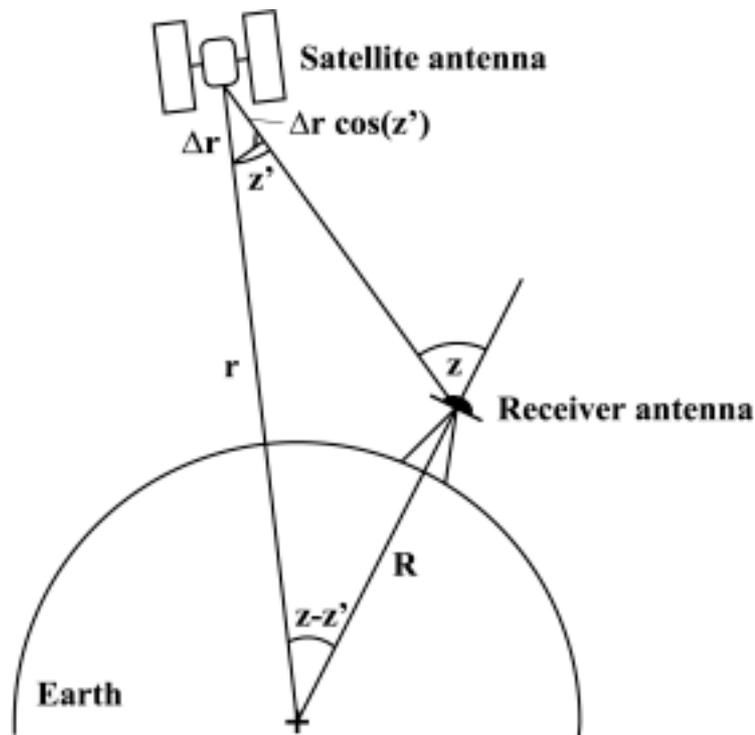


Abbildung 3: Beziehung zwischen den Phasenzentrumsvariationen der Satelliten- und Empfängerantennen.

Ein elevationsabhängiges Verhalten der Satellitenantenne kann beispielsweise sehr einfach durch eine Änderung des Satellitenantennenoffsets um den Betrag Δr erzeugt werden (siehe Abbildung 3). Die entsprechende Änderung im Antennenverhalten des Satelliten ist dann gegeben durch:

$$\Delta\phi'(z') = \Delta r \cdot (1 - \cos(z')) = \Delta r \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{r^2} \sin^2(z)} \right)$$

(Der Rest der Offsetänderung Δr wird in die Satellitenuhrkorrekturen absorbiert oder wird durch Differenzbildung eliminiert).

Aufgrund dieser Eins-zu-Eins-Beziehung zwischen den Variationen der Empfänger- und Satellitenantennen, können nun die unrealistischen Effekte der absoluten Empfängerantennenvariationen auf globale GPS-Resultate mit einer elevationsabhängigen Variation der Satellitenphasenzentren korrigiert werden. Anstatt eine solche Korrektur vorzunehmen, ist es jedoch aus wissenschaftlicher Sicht vorzuziehen, die Elevationsabhängigkeit der Satellitenphasenzentren direkt aus globalen GPS-Daten zu bestimmen. Dies wurde mit einer modifizierten Version der „Bernese GPS Software“ realisiert (siehe auch [Schmid et al., 2002]).

Abbildung 4 zeigt die resultierenden Variationen der Satelliten-PCVs. Wir sehen sehr schön, dass sich die Block II/IIA und Block IIR Antennen unterschiedlich verhalten in Abhängigkeit des Nadirwinkels. Die eingetragenen formalen Fehler zeigen, dass die Phasenzentrumsvariationen mit einer Genauigkeit von ungefähr einem Millimeter bestimmt werden können. Die Wiederholbarkeit der Resultate von Tag zu Tag und die Unterschiede zwischen den Variationen einzelner Satelliten haben mit 1-2 mm eine ähnliche und somit konsistente Größenordnung. Es muss hier noch erwähnt werden, dass für die Bestimmung der Variationen der Satellitenantennenphasenzentren die Koordinaten der globalen GPS-Stationen (genauer gesagt eigentlich der Maßstab des globalen Netzes) als bekannt angenommen werden mussten.

In Anbetracht der offensichtlichen Verknüpfung zwischen den Empfänger- und Satelliten-PCVs wird im IGS diskutiert, ob auf einen einheitlichen Satz von absoluten Empfänger-PCVs (zurzeit werden im IGS nur PCVs relativ zur AOAD/M_T-Antenne verwendet (und dazu konsistenten Satelliten-PCVs übergegangen werden kann und soll. Ein Vorschlag für ein neues, flexibleres und einheitliches Format für Antenneninformation (Satellit und Empfänger) ist bereits erarbeitet worden.

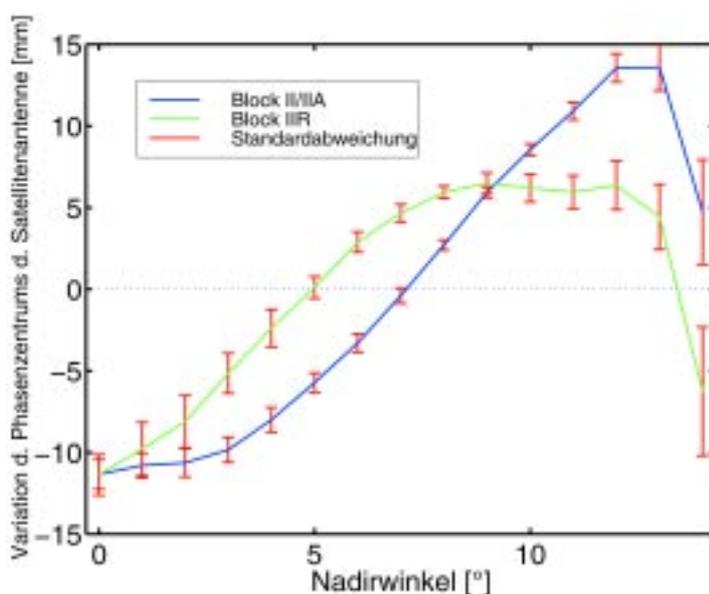


Abbildung 4: Bestimmung von elevationsabhängigen Variationen des Phasenzentrums der GPS-Satellitenantennen für Block IIR-Satelliten aus globalen Daten des IGS-Netzes.

Schlussfolgerungen

Mit der neuen Antennenkalibrierungsmethode des Instituts für Erdmessung der TU Hannover und der Firma Geo++ (Drehen und Verkippen der GPS-Antenne mit einem Roboter) und den Kammermessungen, hat man nun zwei unabhängige Verfahren zur Verfügung, um absolute Variationen der Empfängerphasenzentren zu bestimmen. Die Resultate dieser zwei Methoden stimmen recht gut überein, insbesondere für die AOAD/M_T-Antenne, die im IGS als Referenzantenne verwendet wird. Die Kalibrierungswerte der Hannover-Gruppe stimmen auch sehr schön (im Bereich von 1-2 mm) mit den offiziellen, relativen Werten des IGS überein.

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die absoluten Empfänger-PCVs korrekt sein dürften und dass das Problem mit der unrealistischen Skalierung der globalen Lösungen um rund 15 ppb (10 cm in allen Stationshöhen) an den nicht-berücksichtigten Variationen der Satellitenantennenphasenzentren liegen muss. Erfolgreich konnten daraufhin Variationen der Satellitenphasenzentren aus globalen GPS-Daten mit einer Genauigkeit von ca. 1-2 mm bestimmt werden. Für den nächsten Release von IGS-Antennenkalibrierungswerten wird versucht werden, einen konsistenten und sehr genauen Satz sowohl für die Empfänger- also auch für die Satellitenantennen zu liefern. Ein entsprechendes Antennen-File-Format ist bereits in Vorbereitung.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. G. Seeber und Dr. G. Wübbena und ihren Gruppen für ihre Bereitschaft, uns die Roboterresultate ihrer absoluten Antennenkalibrierungen für diese Untersuchungen hier zur Verfügung zu stellen.

Abbildung 4: Bestimmung von elevationsabhängigen Variationen des Phasenzentrums der GPS-Satellitenantennen für Block II/IIA und Block IIR Satelliten aus globalen Daten des IGS-Netzes.

Literatur

Aparicio, M., P. Brodie, L. Doyle, J. Rajan, P. Torrione (1996).

GPS Satellite Payload, Global Positioning System: Theory and Applications, Editors: B.W. Parkinson and J.J. Spilker, Vol. 1, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163, 209-244.

Mader, G. (1999).

GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey, GPS Solutions, Vol. 3, No. 1, pp. 50-58, 1999.

Menge, F., G. Seeber, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1998).

Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. Proceedings of the ION GPS Meeting 1998, Nashville, Tennessee.

Rocken, C., C. Meertens, B. Stephens, J. Braun, T. VanHove, S. Perry, O. Ruud, M. McCallum, J. Richardson (1996).

UNAVCO Academic Research Infrastructure (ARI) Receiver and Antenna Test Report. Technical Report, UNAVCO, Boulder, CO, 1996.

Rothacher, M., W. Gurtner, S. Schaer, R. Weber, W. Schlüter, H.O. Hase (1996).

Azimuth- and Elevation-Dependent Phase Center Corrections for Geodetic GPS Antennas Estimated from GPS Calibration Campaigns. GPS Trends in Precise Terrestrial Airborne, and Spaceborne Applications, International Association of Geodesy Symposia, Boulder, CO, July 3-4, 1995, G. Beutler, G. W. Hein, G. Seeber, W. G. Melbourne, Vol. 115, pp. 333-338, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Schmid, R., M. Rothacher (2002).

Estimation of Elevation-Dependent Satellite Antenna Phase Center Variations of GPS Satellites, in Vorbereitung für JoG.

Schupler, B.R., T.A. Clark, R.L. Allshouse (1996).

Characterizations of GPS User Antennas: Reanalysis and New Results. GPS Trends in Precise Terrestrial Airborne, and Spaceborne Applications, International Association of Geodesy Symposia, Boulder, CO, July 3-4, 1995, G. Beutler, G. W. Hein, G. Seeber, W. G. Melbourne, Vol. 115, pp. 328-332, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Springer, T.A. (1999).

Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the Global Positioning System. Ph.D. thesis, Astronomical Institute, University of Berne, University Press, Nov. 1999.

Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000).

Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time, Proceedings of the ION Meeting 2000, Salt Lake City.